



HAL
open science

Détermination du profil de modulation des réseaux holographiques de phase

S. Mechahougui, J. Harthong, A. Medjahed

► **To cite this version:**

S. Mechahougui, J. Harthong, A. Medjahed. Détermination du profil de modulation des réseaux holographiques de phase. *Journal de Physique III*, 1993, 3 (12), pp.2287-2297. 10.1051/jp3:1993275 . jpa-00249083

HAL Id: jpa-00249083

<https://hal.science/jpa-00249083v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

42.40D — 42.40F — 42.40H

Détermination du profil de modulation des réseaux holographiques de phase

S. Mechahougui, J. Harthong et A. Medjahed

Université Louis Pasteur, École Nationale Supérieure de Physique, Laboratoire des Systèmes Photoniques, 7 rue de l'université, 67084 Strasbourg Cedex, France

(Reçu le 26 avril 1993, révisé le 9 juillet 1993, accepté le 9 septembre 1993)

Résumé. — La connaissance parfaite des paramètres géométriques et physico-chimiques d'un matériau de volume modulé périodiquement, donne une bonne connaissance de la figure de diffraction. Celle-ci a une grande importance scientifique et technologique. Le profil de modulation (donné par ses coefficients de Fourier) est l'un de ces paramètres qui ne peut être déterminé *a posteriori* qu'à partir de la répartition d'intensité entre les différents ordres. A partir de cette idée, nous avons établi une méthode exacte permettant l'étude de la diffraction d'une onde plane électromagnétique par un réseau diélectrique, qui conduit au traitement numérique d'une équation différentielle à coefficients variables. La méthode est donnée pour le cas classique où le champ électrique est parallèle au plan du réseau. Pour analyser l'influence du profil de modulation, on considère des modèles mathématiques réalistes et non (comme il est courant dans la littérature) des modèles physiques irréalisables. Pour notre travail expérimental nous avons mis au point deux montages : le premier pour l'enregistrement et le second pour l'analyse. Ce dernier est totalement automatisé et piloté par un ordinateur. Les résultats obtenus sont largement discutés.

Abstract. — The complete knowledge of the geometrical and physic-chemical parameters of a periodically modulated volume material, permits the determination of the diffraction picture. Such a purely mathematical and numerical determination is of great scientific and technological interest. The modulation profile (given by its Fourier coefficients) is one of these parameters. It can be determined *a posteriori* only by the measurement of the different diffracted intensities at different orders. Starting from this idea, we can achieve a new method (theoretically exact) which permits the study of the diffraction of an electromagnetic plane wave by a dielectric grating. This method leads to the numerical treatment of ordinary differential equation with variable — by periodic — coefficients. The method is presented here for the classical case of a wave with electric polarization parallel to the grating. For the analysis of the modulation profile, we have considered realistic models of profiles, contrary to the current models, which have only a numerical existence. In order to achieve our experimental work, we have developed two experimental set-up: the first for the recording and the second for the analysis of diffractive elements. The whole set-up can be directed with the aid of a software from a personal computer. The validity of results are discussed.

1. Introduction.

L'analyse et le contrôle des réseaux à modulation d'indice fait appel à des méthodes spécifiques de mesure selon le paramètre à contrôler : épaisseur de la couche modulée, indice de réfraction moyen, période du réseau (cette dernière étant de très loin le paramètre le plus facile à déterminer). Parmi tous les paramètres caractérisant un réseau, le plus difficile à contrôler est cependant le *profil* de la modulation d'indice ; en fait celui-ci recouvre plusieurs paramètres scalaires qui sont les coefficients de Fourier du profil. En vertu de cette difficulté, peu de travaux sont consacrés à la mesure optique (indirecte et non destructive) du profil, alors que pour la détermination de l'épaisseur ou de l'indice d'une couche on dispose de techniques sophistiquées et très précises.

Il n'existe pas de méthode permettant la détermination systématique et complète du profil à partir de la seule connaissance des efficacités de diffraction à tous les ordres, et de fait, ainsi posé sous cette forme naïve, le problème est intrinsèquement difficile. Cependant les profils possibles ne sont pas arbitraires [1]. On ne peut pas obtenir n'importe quel profil donné à l'avance à partir de l'enregistrement de franges d'interférences. Lorsqu'il s'agit de modulations de surface, il existe des techniques pour réaliser un profil donné à l'avance : par gravure à l'aide d'un diamant spécialement profilé (possible pour des réseaux métalliques) ou par masques et abrasion à l'aide de faisceaux d'ions. Mais la réalisation de réseaux de volume à modulation d'indice n'est possible que par l'enregistrement d'une figure spatiale de franges d'interférences dans un matériau photosensible. Si la réponse du matériau à l'exposition est uniformément linéaire, le profil enregistré sera identique au profil de l'éclairement, c'est-à-dire sinusoïdal. Mais tout matériau n'est linéaire que dans un certain intervalle et si l'énergie d'exposition dépasse un certain seuil il y a saturation ; une telle saturation aura pour effet de déformer (d'aplatir) la modulation de l'éclairement. Des travaux effectués notamment par Blair, Slinger, Solymar, Syms (Holography group, University of Oxford ; voir [2, 3]) ont montré l'effet de cette saturation sur la forme du profil enregistré, aussi bien dans les émulsions argentiques blanchies que dans la gélatine bichromatée.

Le but du groupe d'Oxford était de déterminer le type de profil qu'il est possible d'obtenir sous forme de modulation d'indice. Pour cela ils ont analysé très soigneusement la réponse du matériau à l'exposition, et leurs travaux répondent donc à la question : "connaissant l'exposition et les conditions du traitement chimique, quel sera le profil de variation de l'indice ?"

Le but que nous nous proposons dans cet article est la détermination *a posteriori* du profil dans un réseau dont on ne connaîtrait pas les conditions d'enregistrement. Nous répondons donc à la question : pour un réseau donné dont on ignore les conditions d'enregistrement ou de traitement chimique, déterminer le profil de modulation de l'indice de réfraction à partir de la connaissance des efficacités de diffraction".

On ne pourra répondre à cette question si on ignore tout du profil ; les inconnues du problème seraient alors les coefficients de Fourier du profil (en pratique jusqu'à l'ordre 3 compte tenu de la précision qu'il est raisonnable d'espérer : cela ferait six inconnues). Or six inconnues demanderaient pour être déterminées un nombre énorme de mesures différentes. Mais les travaux du groupe d'Oxford [2, 3, 9] permettent de réduire considérablement le nombre d'inconnues, car ils ont proposé un *modèle empirique* de profil pour décrire les profils ayant subi une saturation ; en effet un enregistrement avec saturation ne reproduit pas une sinusoïde parfaite, mais n'aboutit pas non plus à n'importe quelle forme de modulation. L'aplatissement de la sinusoïde est décrit par le modèle du groupe d'Oxford et celui-ci ne fait intervenir qu'un paramètre en plus de l'amplitude de modulation. De sorte que le problème inverse s'en trouve simplifié et peut alors être traité expérimentalement.

Blair *et al.* [3] ont proposé la formule suivante pour la réponse (non linéaire) $n(r)$ à l'exposition $E(r)$ pour rendre compte de la saturation de la gélatine bichromatée suite à de fortes expositions :

$$n(r) = N_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{E(r)}{E_0} \right) \right] \quad (1)$$

où $n(r)$ est la variation de l'indice de réfraction à travers le vecteur de position r , N_0 et E_0 sont des constantes, $E(r)$ est l'exposition totale. Pour une simple exposition la modulation de l'indice de réfraction peut être calculée selon l'expression suivante (d'après [3]) :

$$n(r) = N_0 \left[1 - \exp \left\{ -\frac{E_1(1+b_1)}{E_0} \right\} \cdot \left[I_0(z_1) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} I_i(z_1) \cos(iK_1 \cdot r + i\pi) \right] \right] \quad (2)$$

où : b_1 est le rapport des intensités des faisceaux, K_1 le vecteur du réseau, E_1 l'exposition, $I_i(z_1)$ la fonction de Bessel modifiée et $z_1 = 2\sqrt{b_1} \frac{E_1}{E_0}$.

En posant $N_0 = 0,04$ et $E_0 = 1000 \text{ mJ/cm}^2$ Blair *et al.* [4] ont tracé les profils de modulation pour différentes expositions d'une part et en variant le rapport des faisceaux d'autre part. Les courbes obtenues font apparaître clairement que plus l'exposition augmente plus le profil de modulation devient non sinusoïdal vérifiant ainsi l'effet de saturation.

Pour la commodité de notre analyse, nous avons introduit nos propres modèles de profil (voir Fig. 3). Notre modèle de profil avec saturation dérive du modèle d'Oxford en tronquant la série de Fourier de ce dernier à l'ordre 4 (profil d de la Fig. 3).

2. Etude numérique et expérimentale.

Les réseaux étudiés dans cet article sont à base de gélatine bichromatée. Les procédés de traitement utilisés sont similaires à ceux décrits par Chang et Leonard [8] et Newell [9]. L'arrangement expérimental utilisé pour l'enregistrement des réseaux est décrit par la figure 1.

Afin d'obtenir des réseaux non inclinés ($\omega = 90^\circ$ voir [5]), on fait en sorte que les deux faisceaux d'enregistrement sont symétriques par rapport à la normale à l'échantillon. La mesure des épaisseurs a été effectuée à l'aide d'une méthode se basant sur l'approximation de Born élaborée au laboratoire [10]. La mesure de l'indice de réfraction moyen a été effectuée à l'aide du réfractomètre d'Abbe.

Un montage pratique et automatisé destiné à analyser les efficacités transmises (*rapport entre l'intensité à l'ordre de diffraction x et l'intensité incidente*) à tous les ordres en fonction de l'angle d'incidence est schématisé sur la figure 2. Afin d'éviter les fluctuations indésirables (les effets de bords et de non uniformité de l'épaisseur de couche, surtout pour le cas de la gélatine où le couchage peut introduire de grandes irrégularités dans l'uniformité de l'épaisseur, ce qui peut entraîner des fluctuations importantes lorsque l'analyse s'effectue à l'air), les réseaux sont analysés dans un liquide de compensation de phase (le xylène qui a un indice de réfraction très proche de celui du verre 1,49). Le réseau est analysé en fonction de l'angle d'incidence, les intensités mesurées à tous les ordres de diffraction sont alors normalisées par rapport à l'intensité du faisceau incident (sans hologramme) et corrigées en tenant compte des pertes dues aux réflexions sur les deux interfaces de la cuve de compensation d'indice. En effet, nous avons constaté la variation du signal incident en fonction de l'angle d'incidence dans le cas où la cuve est pleine de xylène mais en l'absence de réseau. Ainsi on constate une certaine diminution du signal en s'éloignant de l'axe optique ; cette diminution qui n'est pas due au phénomène de diffraction doit être prise en considération pour la correction de la courbe expérimentale.

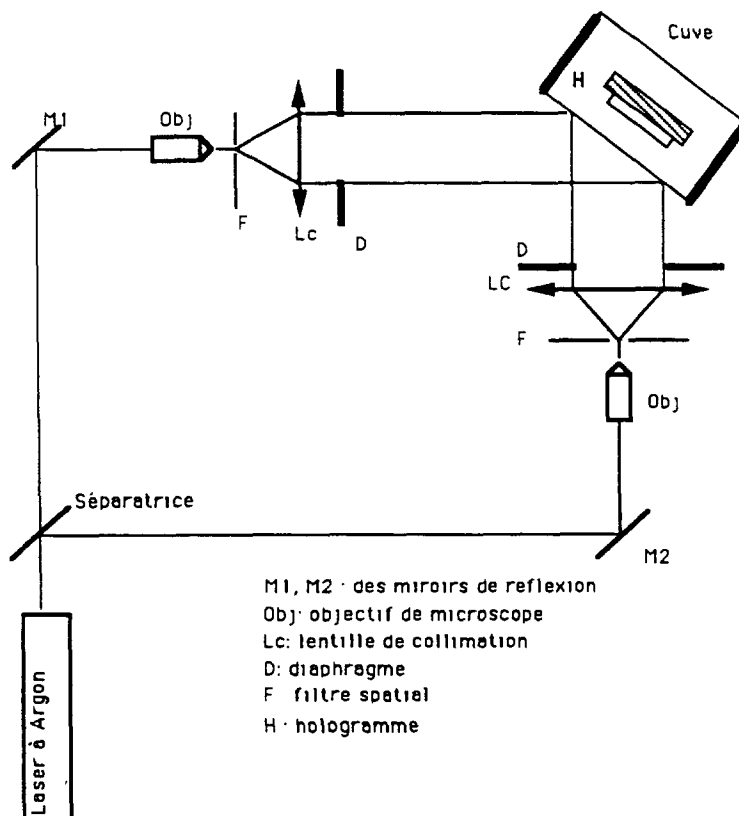


Fig. 1. — Montage expérimental utilisé pour l'enregistrement des réseaux holographiques.
 [Experimental set-up used for the recording of the holographic grating.]

2.1 MISE EN ÉVIDENCE DE L'APLATISSEMENT. — Afin de montrer qu'il est possible de détecter *a posteriori* un aplatissement du profil par saturation, nous considérons un échantillon de modèles de profils ; ces modèles sont choisis de manière à représenter aussi fidèlement que possible des profils réels obtenus par enregistrement avec saturation plus ou moins prononcée. L'échantillon de profils est donné dans la figure 3 : le profil (b) est un profil parfaitement sinusoïdal, correspondant à un enregistrement parfait, c'est-à-dire sans saturation. Lorsque la saturation commence à se manifester, les profils évoluent vers la forme (d). Les profils (a) et (c) sont donnés et étudiés numériquement à titre de comparaison : ils ne correspondent pas à des profils expérimentaux.

Il est donc naturel de considérer les profils sinusoïdaux comme des profils obtenus à faible exposition, leur amplitude étant à peu de choses près proportionnelle à l'énergie d'exposition (pour un temps donné), tandis que les profils du type (d) sont des profils obtenus à forte exposition, l'aplatissement étant d'autant plus marqué que l'énergie d'exposition est plus élevée ; dans ce cas l'amplitude n'augmente plus sensiblement avec l'énergie d'exposition.

Nous allons montrer que l'aplatissement "se voit" au niveau de la courbe représentant l'efficacité de diffraction en fonction de l'angle d'incidence. Ceci sera montré par calcul

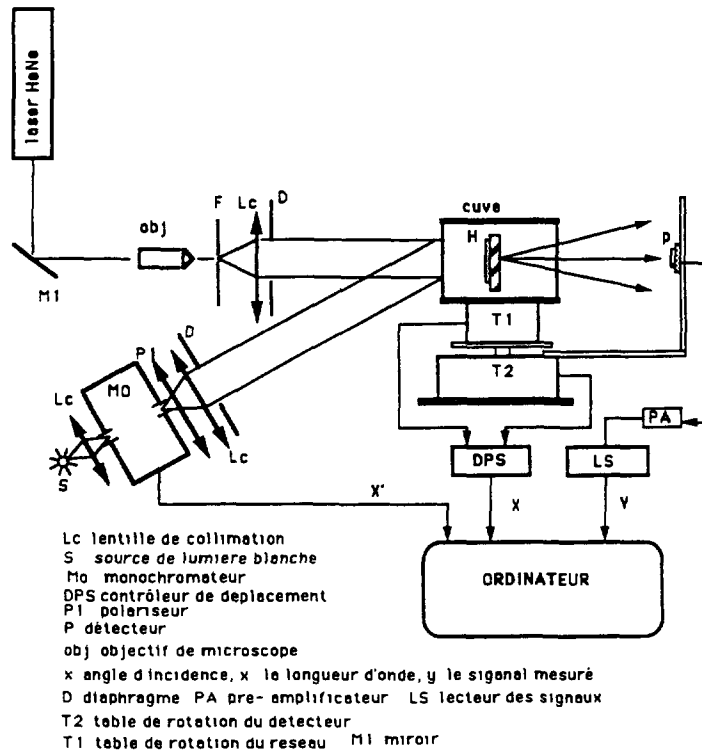


Fig. 2. — Montage expérimental d'analyse des réseaux holographiques.
 [Experimental set-up used for holographic grating analysis.]

numérique effectué pour les profils (b) et (d), montrant un décalage des courbes ; et par mesure expérimentale des efficacités de diffraction.

Afin que ces mesures soient significatives, il est bien sûr nécessaire de contrôler l'amplitude de modulation n_1 , les différences entre les courbes ne pouvant être attribuées avec certitude à l'aplatissement que si les amplitudes de modulation des deux réseaux sont proches.

2.2 PRINCIPE DE LA MÉTHODE PAR AJUSTEMENT. — Afin de montrer qu'il est possible de détecter un aplatissement du profil par saturation, nous considérons les deux types de profil b et d (voir Fig. 3). Ces deux profils sont effectivement réalisables par enregistrement d'une figure d'interférence. Pour la détermination du profil de modulation *a posteriori* nous procédons de la façon suivante :

- 1) enregistrement des réseaux holographiques selon une configuration bien déterminée ;
- 2) détermination expérimentale des paramètres caractéristiques du réseau (épaisseur, indice de réfraction moyen, période...) ;
- 3) analyse expérimentale du réseau en fonction de l'angle d'incidence ou de la longueur d'onde d'incidence ;
- 4) introduction des paramètres du réseau déterminés expérimentalement dans le programme de

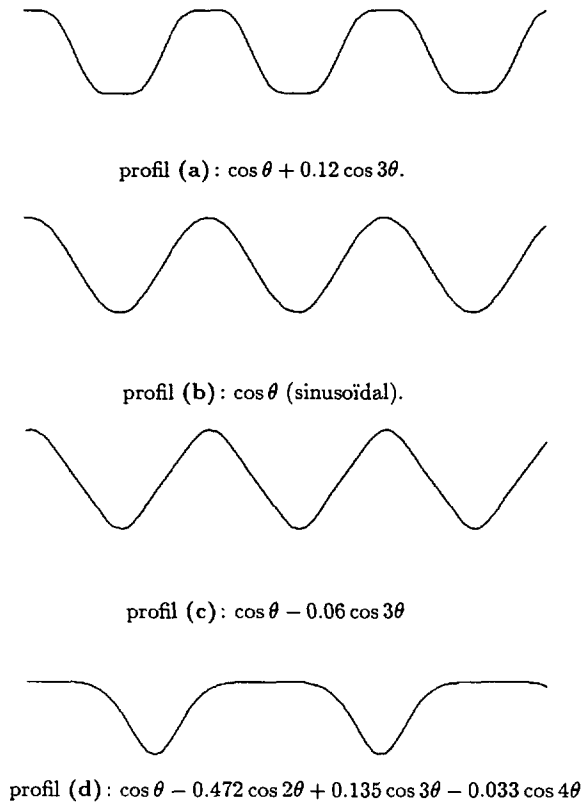


Fig. 3. — Quatre modèles de profils. Le premier (a) est une sinusoïde aplatie symétriquement, ce qui correspondrait à la fois à une saturation et à un infléchissement de la réponse à faible exposition. Le second (b) est une sinusoïde parfaite, ce qui correspond à une réponse purement linéaire du milieu photosensible. Le troisième (c) correspondrait à une réponse accentuée à forte et à faible exposition et est donc irréalisable en milieu photosensible. Le quatrième (d) correspond à une exposition dont les maxima dépassent le seuil de saturation : c'est le type de profil attendu en cas de forte exposition. [The types of profile studied.]

calcul et lancement du programme pour différents profils en variant l'amplitude de modulation n_1 . Les programmes de calcul que nous utilisons sont basés sur la théorie alternative de la diffraction dans les milieux modulés [5].

La méthode par ajustement consiste alors à comparer les courbes tracées à partir de ces calculs numériques aux courbes expérimentales. Si on constate par exemple que la courbe de l'efficacité de diffraction en fonction de l'angle d'incidence pour un profil sinusoïdal ne coïncide avec la courbe expérimentale pour aucune valeur réaliste de l'amplitude de modulation n_1 , on est fondé à conclure que le réseau n'est pas sinusoïdal.

Inversement, si on obtient la coïncidence pour une certaine valeur de n_1 il reste encore à vérifier qu'un tel ajustement ne peut pas avoir lieu aussi pour un profil aplati, avant de pouvoir conclure que le réseau analysé est sinusoïdal. Quoique nos essais ne soient pas absolument exhaustif, il apparaît cependant clairement que dans tous les cas étudiés, nous n'observons jamais la coïncidence pour deux profils différents (l'un sinusoïdal, l'autre aplati) à la fois. Bien entendu nous comparons des courbes entières et non des valeurs particulières (voir Figs. 4 à 7).

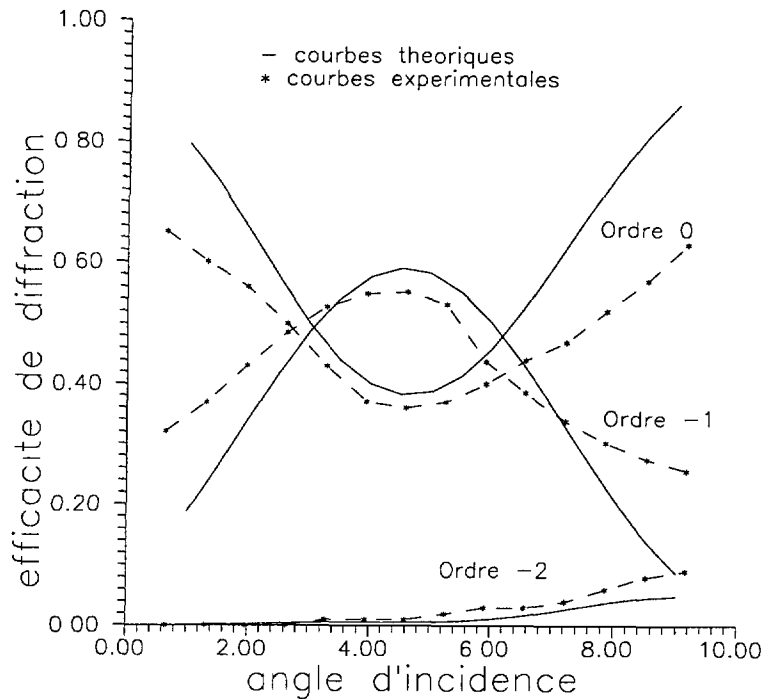


Fig. 4. — Courbes expérimentales et numériques (pour le cas du profil du type b avec une amplitude de modulation de 0,008) de l'efficacité de diffraction en fonction de l'angle d'incidence pour une longueur d'onde fixe de $0,6328 \mu\text{m}$ à tous les ordres.

[Experimental and numerical (case of b profile with modulation amplitude of 0.008) curves of diffraction efficiency to function of incidence angle and a fixed wavelength $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ at all diffraction orders.]

S'il devait arriver (mais cela ne s'est pas produit dans nos essais) que deux courbes, correspondant l'une à un profil sinusoïdal avec amplitude n_1' , l'autre à un profil aplati avec amplitude n_1'' , coïncident *toutes deux* avec une courbe expérimentale, on ne pourrait départager. Mais on pourrait affiner l'analyse en traçant également les courbes expérimentales et numériques pour l'efficacité de diffraction en fonction de la longueur d'onde, en plus des courbes de l'efficacité en fonction de l'angle d'incidence ; ou encore, les tracer en polarisation TH au lieu de TE, jusqu'à ce qu'on parvienne à départager. L'ajustement a lieu pour un profil et une amplitude de modulation donnés, et on vérifie que les courbes numériques et les courbes expérimentales coïncident à tous les ordres.

3. Résultats.

Les résultats que nous présentons ici sont obtenus à partir d'un réseau à base de gélatine bichromatée avec une épaisseur de la couche de $21 \mu\text{m}$, un indice moyen de 1,50, $\xi = \lambda/\Lambda = 0,159$ pour une longueur d'onde de $0,6328 \mu\text{m}$, $\omega = 90^\circ$ (angle d'inclinaison des strates). Nous ne connaissons pas l'énergie d'exposition (notre but est le contrôle *a posteriori*), mais nous savions qu'il s'agissait d'un réseau moyennement exposé (donc en principe avec une saturation négligeable). Notre travail consiste alors à confirmer ou infirmer cette information et

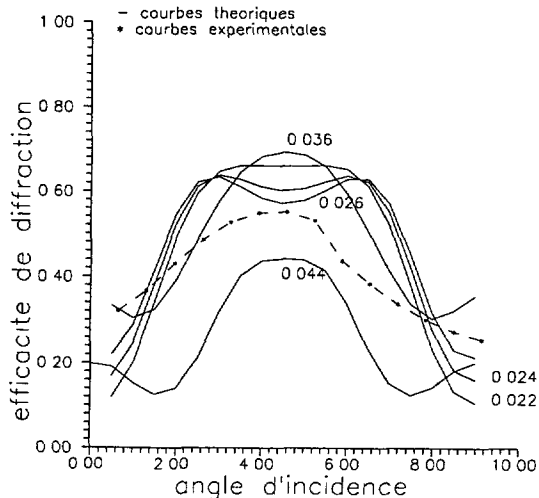
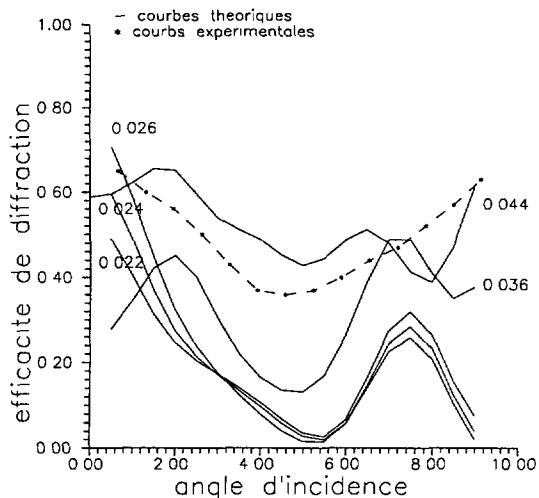
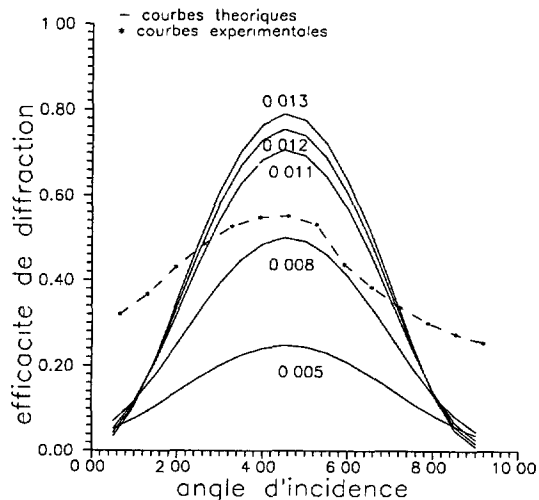
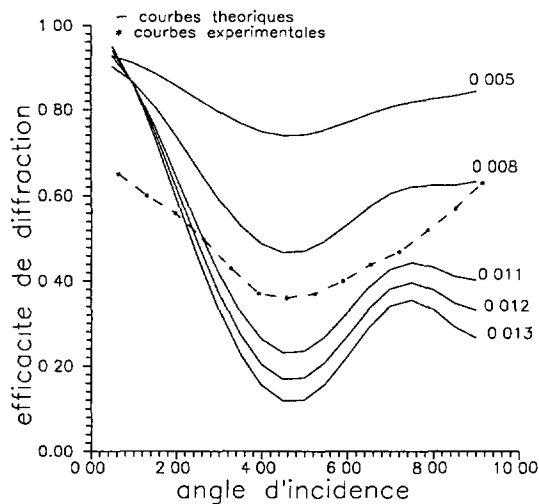


Fig. 5

Fig. 6

Fig. 5. — Courbes expérimentales et numériques (pour le cas du profil du type d pour 10 valeurs de l'amplitude de modulation n_1) de l'efficacité de diffraction en fonction de l'angle d'incidence pour une longueur d'onde fixe de $0,6328 \mu\text{m}$ à l'ordre 0.

[Experimental and numerical (case of d profile with different modulation amplitude n_1) curves of diffraction efficiency to function of incidence angle and a fixed wavelength $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ at 0 diffraction order.]

Fig. 6. — Courbes expérimentales et numériques (pour le cas du profil du type d pour 10 valeurs de l'amplitude de modulation n_1) de l'efficacité de diffraction en fonction de l'angle d'incidence pour une longueur d'onde fixe de $0,6328 \mu\text{m}$ à l'ordre -1.

[Experimental and numerical (case of d profile with different modulation amplitude n_1) curves of diffraction efficiency to function of incidence angle and a fixed wavelength $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ at -1 diffraction order.]

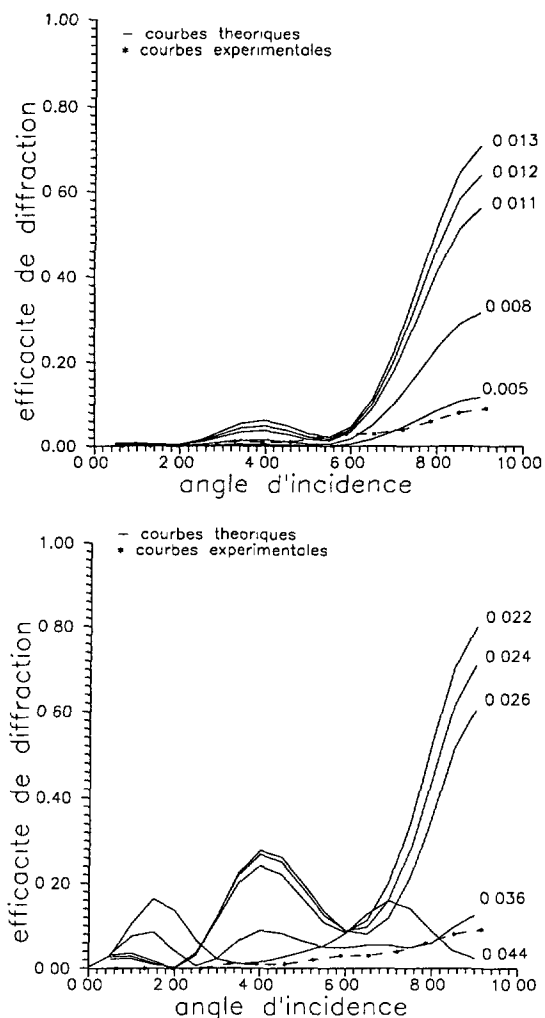


Fig. 7. — Courbes expérimentales et numériques (pour le cas du profil du type d pour 10 valeurs de l'amplitude de modulation n_1) de l'efficacité de diffraction en fonction de l'angle d'incidence pour une longueur d'onde fixe de $0,6328 \mu\text{m}$ à l'ordre -2 .

[Experimental and numerical (case of d profile with different modulation amplitude n_1) curves of diffraction efficiency to function of incidence angle and a fixed wavelength $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ at -2 diffraction order.]

vérifier en même temps la validité de notre méthode de détermination du profil de modulation. Le réseau a été analysé à l'aide du montage de la figure 2 en variant l'angle d'incidence pour une longueur d'onde fixe correspondant à la longueur d'onde du laser HeNe c'est-à-dire $0,6328 \mu\text{m}$. Entre-temps nous avons introduit les paramètres du réseau dans notre programme de calcul et nous avons varié l'amplitude de modulation de 0,002 à 0,045 avec un pas de 0,002 pour le cas des deux profils b et d de la figure 3. L'ajustement des courbes de diffraction théoriques et expérimentales à tous les ordres a eu lieu pour un profil de modulation du type b et une amplitude de modulation de 0,0080 (voir Fig. 4). On constate effectivement

une bonne concordance entre les courbes expérimentales et les courbes numériques. Pour vérifier l'exactitude de l'amplitude de modulation obtenue par ajustement entre les courbes expérimentales et les courbes numériques nous avons utilisé la formule de Kogelnik [6] (cela est rendu possible par le fait que nous avons obtenu un profil du type b c'est-à-dire sinusoïdal), ce qui nous a permis d'obtenir une valeur très proche de la valeur obtenue par ajustement et qui est de 0,0087. Ainsi deux méthodes *indépendantes* ont abouti au même résultat.

Dans les figures 5, 6 et 7 nous avons tracé les courbes expérimentales et les courbes numériques (pour 10 valeurs de l'amplitude de modulation allant de 0,005 à 0,045 correspondant au profil du type (d) pour le cas de l'ordre 0, -1 et -2 respectivement. Il apparaît clairement d'après ces courbes que les résultats expérimentaux et numériques obtenus par le profil du type d sont différents. Ici intervient un aspect logique essentiel de cette méthode d'ajustement : lorsque dans les calculs numériques on fait varier continuellement (ou avec un pas suffisamment petit) le paramètre *amplitude de modulation* n_1 , on observe une coïncidence entre la courbe calculée (théorique) qui est variable et la courbe expérimentale unique pour une valeur particulière de l'amplitude de modulation. Mais cela ne suffit pas à fonder la conclusion qu'on a détecté la bonne amplitude de modulation, car la forme du profil n'est pas connue à l'avance. Il faut s'assurer que la coïncidence n'est pas possible également avec une autre forme de profil (aplatis par exemple) et une autre valeur de l'amplitude de modulation.

C'est la raison pour laquelle les vérifications, faites pour le profil d, et dont le résultat est représenté dans les figures 5, 6, et 7, étaient nécessaires.

Une vérification pour d'autres formes arbitraires de profil n'est par contre pas utile. En effet, dans le contrôle *a posteriori* on ignore si le réseau avait été faiblement ou fortement exposé ; mais on n'ignore pas que seule une forme particulière de profil est possible, modélisée par les profils (b) ou (d) (ou leurs interpolations) : un profil tel que (c) par exemple peut être exclu *a priori*.

4. Conclusion.

La méthode mathématique utilisée dans le présent travail ne comporte aucune approximation de principe ; on néglige cependant les inhomogénéités de la couche modulée ainsi que les pertes par absorption, mais on ne néglige pas par exemple les dérivées secondes dans les équations différentielles. Ce calcul mathématiquement exact ne permet pas d'expression analytique et ne peut être formulé que sous forme de programmes de calcul numérique, contrairement à ce que permettraient par exemple les formules de Kogelnik. Mais par contre il permet de tenir compte des harmoniques d'ordre supérieur qui interviennent lors de l'enregistrement et de l'analyse de l'image de diffraction du réseau du fait que la réponse du milieu photosensible n'est pas linéaire. Ainsi nous avons montré qu'il est possible de détecter *a posteriori* les effets non-linéaires de l'enregistrement, par la simple analyse des faisceaux diffractés, c'est-à-dire sans faire appel à un dispositif de mesure sophistiqué. Il est à noter que l'objectif de cet article ne portait pas sur l'étude de la non uniformité des réseaux de volume. Cette dernière (la non uniformité) concerne soit la modulation de l'indice de réfraction, le vecteur du réseau ou l'indice de réfraction moyen. Certains auteurs ont cependant étudié certains effets de telles non-uniformités (voir [11]). En outre cette méthode est valable pour tous les matériaux d'enregistrement en holographie (halogénure d'argent, photopolymère ..). En effet nous avons par exemple appliqué cette méthode pour la détermination des profils de modulation à base d'halogénure d'argent Agfa 8E56 avec succès [12, 13].

Bibliographie

- [1] Mechahougui S. et Harthong J., Application d'une théorie alternative de la diffraction pour l'étude des profils de modulation des réseaux holographiques de volume, *J. Phys. II France* **2** (1992) 163-174.
- [2] Slinger C. W., Syms R. R. and Solymar L., Non linear recording in silver halide planar volume holograms, *Appl. Phys. B* **36** (1985) 217-224.
- [3] Blair L. T., Solymar L. and Takacs J., Non linear recording in dichromated gelatin, *S.P.I.E.* **1136** (1989) 12-19.
- [4] Blair L. T. and Solymar L., *Opt. Commun.* **77** (1990) 365-367.
- [5] Harthong J., Alternative theory of diffraction by modulated media, *J.O.S.A.* **8** (1991) 3-10.
- [6] Koegelnik H., *Bell. Sys. Tech. J.* **48** (1969) 2909-2947.
- [7] Gaylord T. K. and Moharam M. G., *Proc. I.E.E.E.* **73** (1985).
- [8] Chang B. J. and Leonard C. D., *Appl. Opt.* **18** (1979) 2407.
- [9] Newell J. C., PHD Oxford university (1987).
- [10] Harthong J. and Medjahed A., Thickness measurement for volume holograms by analysis of first-order diffraction, *Appl. Opt.* **31** (1992) 1803-1809.
- [11] Newell J. C. and Solymar L., *J. Mod. Opt.* **36** (1989) 751-767.
- [12] Mechahougui S., Harthong J. and Meyrueis P., Opto 93. (Paris 11 - 13 Mai 1993).
- [13] Mechahougui S., Thèse de doctorat université Louis Pasteur Strasbourg (Avril, 1993).